

УДК 687.056.8/9

РАЗРАБОТКА 3D-СКАНЕРА ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ ФИГУРЫ ЧЕЛОВЕКА

DEVELOPMENT OF A 3D SCANNER FOR SCANNING A HUMAN FIGURE

Н.А. ЗАМОТИН, А.С. ДЯГИЛЕВ

N.A. ZAMOTIN, A.S. DYAGILEV

(Витебский государственный технологический университет)

(Vitebsk State Technological University)

E-mail: ni-ko-lay@mail.ru; dyagilev@vstu.by

В работе описана разработка 3D-сканера для сканирования фигуры человека с использованием поворотного подиума и сенсоров Kinect. В конструкции 3D-сканера предложено использование лазерных излучателей для последующего упрощения процесса ориентации 3D-модели относительно горизонтальной плоскости в трехмерном пространстве. Предложена конструкция специального инструмента для повышения точности снятия размерных признаков фигуры человека.

The work is devoted to the development of a 3D scanner for scanning a human figure using a pivot podium and "Kinect" sensors. The design of the 3D scanner assumes the use of laser emitters for the subsequent simplification of the process of orientation of the 3D model relative to the horizontal plane in three-dimensional space. The construction of a special tool for increasing the accuracy of measuring the dimension of a human figure is proposed.

Ключевые слова: 3D-сканирование, сканирование фигуры человека, сенсор Kinect, бодисканер.

Keywords: 3D scanning, human figure scanning, Kinect sensor, body scanner.

Обновление ассортимента швейных изделий, повышение эффективности производства и улучшение качества одежды – постоянные и всегда актуальные задачи швейной промышленности. Проектирование любого вида одежды всегда начинается с выбора исходных данных, первой и основной частью которых являются размерные при-

знаки тела человека. Существующий механизм получения размерных признаков тела человека представляет собой трудоемкий и длительный процесс, чаще всего осуществляемый контактными методами. Из-за широкого внедрения IT-технологий в массовое швейное производство, а также наличия современных САПР, реализующих тради-

ционное 2D- и перспективное 3D-конструирование и моделирование [1], большой интерес представляют бесконтактные способы получения информации о размерах и форме тела человека с помощью 3D-сканеров [2].

Ряд зарубежных производителей предлагает готовые системы, называемые бодисканерами [3]. Ежегодно компанией Nometrica Consulting проводится крупнейшая в мире регулярная конференция по бодисканированию 3DBODY.TECH [4]. В общем виде бодисканер – это 3D-сканер, способный создавать 3D-модель фигуры человека и специальное программное обеспечение, позволяющее получить весь диапазон размерных признаков с минимальной погрешностью [5...7]. Внедрению подобных систем в швейные производства Республики Беларусь мешают высокая цена и разнородность получаемых данных из-за различий в методиках снятия размерных признаков, заложенных в программном обеспечении бодисканера и отраженных в ГОСТе [8].

В рамках настоящей работы ставилась задача разработки опытного образца 3D-сканера, позволяющего с высокой точностью проводить сканирование фигуры человека с целью последующего снятия его размерных признаков. Разрабатываемый 3D-сканер должен обладать сравнительно невысокой стоимостью, простой конструкцией, позволяющей без особых усилий осуществлять его транспортировку, достаточной для целей конструирования одежды и независимой от квалификации оператора точностью сканирования.

Анализ существующих решений

Начальным этапом разработки 3D-сканера для сканирования фигуры человека является выбор технологии 3D-сканирования. Технологий 3D-сканирования существует множество. Они делятся на контактные и бесконтактные, бесконтактные, в свою очередь, делятся на активные и пассивные. Выбор технологии 3D-сканирования необходимо осуществлять, учитывая свойства, размеры и сложность объекта сканирования. Поэтому были сформулированы требования, которым должен отвечать 3D-сканер для сканирования фигуры человека: высо-

кая скорость сканирования, безопасность технологии для глаз человека, возможность захвата текстур (цветное сканирование).

Учитывая требования, предъявляемые к 3D-сканеру для сканирования фигуры человека, была выбрана бесконтактная активная технология 3D-сканирования, предлагаемая израильской компанией PrimeSense [10] и реализованная в сенсорах Kinect [11]. Данный сенсор при помощи инфракрасного излучателя проецирует на сканируемый объект образец инфракрасных лучей, которые, отражаясь от объекта сканирования, принимаются с помощью датчика глубины. Это захваченное изображение передается на специализированную микросхему, где преобразуется в карту глубины. Одновременно с этим, при помощи RGB-камеры, сенсор захватывает цветное изображение. На основе карты глубины и цветного изображения строится изображение глубины сцены [12].

Сенсор Kinect обладает полем зрения в 57 градусов по горизонтали и в 43 градуса по вертикали [13], поэтому он сможет захватить только часть поверхности сканируемого объекта в определенный момент времени.

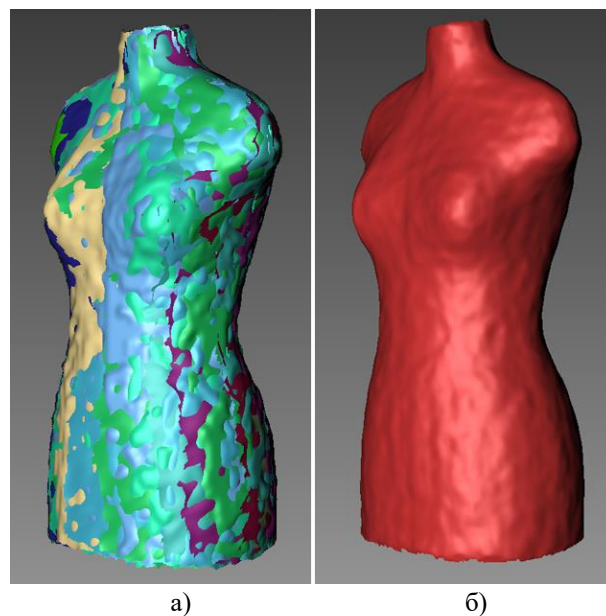


Рис. 1

Процесс сканирования с помощью данного сенсора состоит из нескольких этапов: захват и преобразование отдельных частей

сканируемого объекта в 3D-сети (рис. 1 – этапы сканирования при помощи сенсора "Kinect": а – захват, преобразование и выравнивание отдельных частей сканируемого объекта, б – результирующий 3D-объект), выравнивание их относительно друг друга (рис. 1-а) и объединение всех 3D-сетей в 3D-объект (рис. 1-б).

Следующий этап разработки 3D-сканера – выбор конструктивного решения. Выбор конструктивного решения необходимо осуществлять, учитывая требования, предъявляемые к 3D-сканерам для сканирования фигуры человека, и технические характеристики сенсоров Kinect.

В результате анализа 20 моделей 3D-сканеров ведущих мировых производителей (Artec Shapify Booth, Artec Eva, 3dMDbody.t System, Botscan, VECTRA WB360, Fit3D, mPort mPod, Naked 3D Fitness Scanner, SS20 3D Body Scanner, Styku S100, TELMAT Symcad III, Texel Portal, Twindom Twinstant Mobile, Vitronic VITUS 3D body Scanner, Shapescan, zSnapper 360 Scan, Chishine3d RayGo240, 3D Elements,

Shapeanalysis 3D Body Scanner) [14] и ряда научных работ [15...17] были выделены четыре базовых типа конструкций 3D-сканеров.

Главным критерием группировки конструкций, анализируемых 3D-сканеров в определенный базовый тип, являлся принцип перемещения 3D-сенсора относительно объекта сканирования: тип I – 3D-сенсор перемещается оператором вокруг неподвижного сканируемого объекта, тип II – 3D-сенсоры неподвижны и закреплены на стойке, сканируемый объект вращается вокруг своей оси на поворотном подиуме, тип III – 3D-сенсоры закреплены на штативе, который движется вокруг неподвижного сканируемого объекта, тип IV – 3D-сенсоры неподвижны, закреплены на стойках и расположены со всех сторон неподвижного сканируемого объекта.

В результате анализа базовых типов конструкций 3D-сканеров был выделен ряд сравнительных характеристик, которые приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Характеристики	Тип базовой конструкции 3D-сканера			
	I	II	III	IV
Количество сенсоров (тип Kinect)	1	4	4	16
Поворотная платформа для вращения сканируемого объекта	-	Есть	-	-
Поворотная платформа для вращения 3D-сенсоров	-	-	Есть	-
Количество стоек для установки 3D-сенсоров	-	1	1	4
Влияние квалификации оператора на качество сканирования	Есть	-	-	-
Сложность при транспортировке	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая
Время сканирования, с	600	30	30	1
Степень комфорта для сканируемого человека	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Ориентировочная стоимость, \$ (данные на декабрь 2018 г.)	750	2025	3150	5000

Как видим из табл. 1, при выборе сенсоров типа Kinect на каждую стойку должно приходиться не менее четырех сенсоров, что приводит, с одной стороны, к удорожанию конструкции сканеров типов II, III, IV, включающих в конструкцию от одной до четырех стоек, а с другой стороны, умень-

шается время сканирования с одновременным увеличением точности сканирования.

Конструкции типа II и III должны быть снабжены поворотными механизмами, обеспечивающими либо вращательное движение сканируемого объекта относительно своей оси, либо сенсоров относительно объекта.

Для реализации конструкции типа I достаточно использование одного сенсора, что позволяет удешевить конструкцию и обеспечивает легкость ее транспортировки, однако предполагает наличие соответствующей квалификации оператора, достаточно много времени сканирования, что утомительно для сканируемого человека.

Реализация конструкции типа IV предполагает наличие не менее четырех стоек и при использовании сенсоров Kinect не менее четырех сенсоров на стойке, что приводит к значительному удорожанию конструкции, делает ее стационарной, но при этом обеспечивает минимально возможное время сканирования и максимально возможную точность, не зависящую от квалификации оператора.

Проектирование и разработка 3d-сканера для сканирования фигуры человека

В соответствии с поставленной задачей на основе проведенного анализа для разрабатываемого 3D-сканера была выбрана конструкция типа II, состоящая из стойки с закрепленными на ней четырьмя сенсорами Kinect и поворотной платформы, так как она обеспечивает независимость качества сканирования от квалификации оператора, обеспечивает относительную легкость ее

транспортировки и обладает сравнительно невысокой стоимостью.

Для обеспечения точности снятия размерных признаков с отсканированной модели человека в разрабатываемую модель сканера были внесены соответствующие доработки.

Использование сенсоров Kinect в выбранной конструкции 3D-сканера не позволяет после получения 3D-модели человека однозначно определить ее ориентацию в пространстве. Таким образом, одна из задач, которую нужно решить для обеспечения точности снятия размерных признаков по отсканированной 3D-модели человека, – определение ее ориентации относительно горизонтальной плоскости. Задача по позиционированию 3D-модели ложится на оператора и производится вручную. Если модель будет "завалена", это приведет к неверным результатам измерения обхватов и балансовых измерений [18].

Для ориентации 3D-модели относительно горизонтальной плоскости в трехмерном пространстве поворотная платформа была оснащена лазерными излучателями, проецирующими вертикальные линии на сканируемый объект во фронтальной и сагиттальной плоскостях.

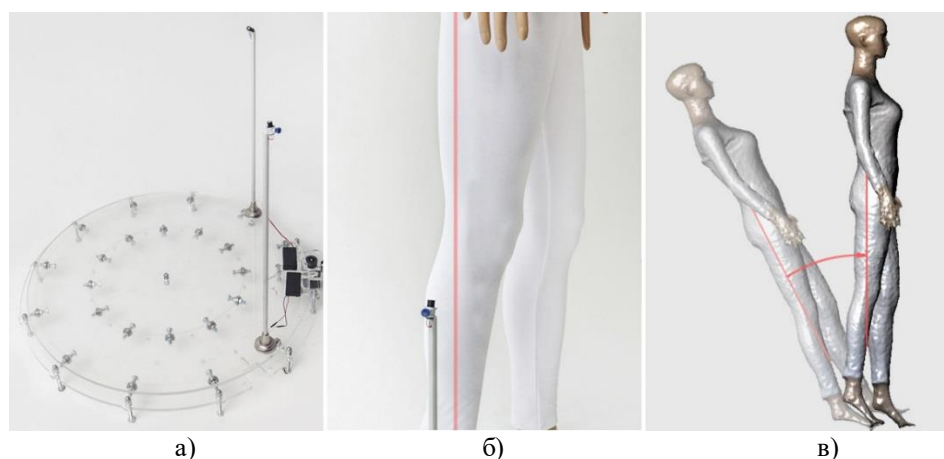


Рис. 2

На рис. 2 представлено приспособление для ориентации 3D-модели относительно горизонтальной плоскости: а – поворотный подиум, оборудованный лазерными излучателями, б – вертикальная полоса, проецируемая излучателем, в – процесс изменения пространственной ориентации 3D модели.

Как видно из рис. 2-а, лазерные излучатели закреплены на поворотной платформе с помощью специальных стоек и вращаются вместе со сканируемым объектом. На рис. 2-б продемонстрирована вертикальная полоса, проецируемая лазером на сканируемый объект. На рис. 2-в проиллюстриро-

ван процесс изменения пространственной ориентации отсканированной 3D-модели на финальном этапе ее создания.

При снятии размерных признаков для построения конструкций плечевой одежды типовой является следующая поза измеряемого человека: стоять без напряжения, не опуская головы, сохраняя привычную для себя осанку, руки должны быть опущены вниз. Подмышечная область является одной из самых сложных областей фигуры человека для снятия размерных признаков по 3D-модели. Так как в этом месте плечо человека имеет тесный контакт с грудной

клеткой, что приводит к эффекту "склеивания" руки с туловищем на 3D-модели (рис. 3-а, б). В результате невозможно однозначно определить местоположения переднего и заднего углов подмышечных впадин на 3D-модели. Для устранения эффекта "склеивания" предложено использовать специальное приспособление, которое представляет собой упругий деформирующийся цилиндр из прозрачного пластика. На рис. 3-в, г продемонстрирован результат использования данного приспособления.

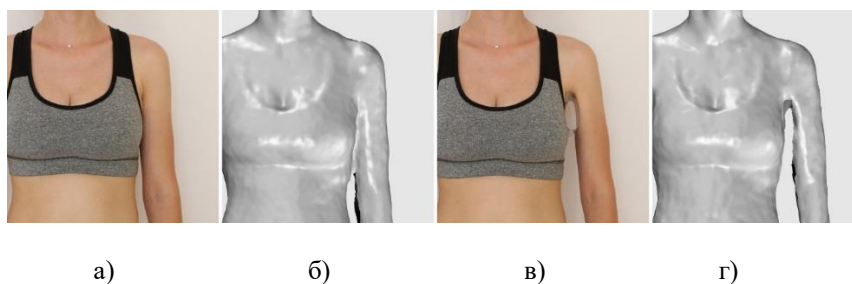


Рис. 3

Обработка полученных при сканировании данных осуществлялась в полуавтоматическом режиме с использованием системы автоматизированного проектирования Rhinoceros 5 [19]. Необходимые антропометрические уровни задаются оператором на 3D-модели в среде Rhinoceros 5.

Для автоматизации процесса измерения размерного признака в среде графического редактора алгоритмов Grasshopper [20] был разработан специализированный модуль, позволяющий на основе ранее заданных антропометрических уровней и компьютерной 3D-модели строить контуры размерных признаков и измерять их длину.

Внешний вид разработанного 3D-сканера представлен на рис. 4.

Для определения точности разработанного 3D-сканера в лабораторных условиях были созданы идеальные условия сканирования. Перемещения объекта относительно 3D-сканера в процессе сканирования, а также его деформация были исключены за счет использования жесткого статического портновского манекена вместо живого человека. Для обеспечения однозначного рас-

положения линий измерений, построенных по 3D-модели и измеренных контактным методом с помощью сантиметровой ленты, на манекене стежками были нанесены контурные линии, соответствующие измеряемым размерным признакам.



Рис. 4

Соблюдая технологию сканирования [21] (отсутствие светоотражающих поверхностей на сканируемом объекте, отсутствие источников инфракрасного света и т.д.), с использованием разработанных модулей было проведено 20 тестовых сканирований манекена. На основе полученных 3D-моделей были произведены измерения обхватов и дуговых размерных признаков портновского манекена: обхват шеи (Т13), обхват груди первый (Т14), обхват груди второй (Т15), обхват груди третий (Т16), обхват талии (Т18), обхват бедер без учета выступа живота (Т20), длина плечевого ската (Т31), расстояние от точки основания шеи сбоку до линии обхвата груди первого спереди (Т34), расстояние от точки основания шеи сбоку до сосковой точки (высота груди) (Т35), расстояние от точки основания шеи сбоку до линии талии спереди (длина талии спереди) (Т36), дуга через высшую точку плечевого сустава (Т38), расстояние от точки основания шеи сзади до уровня заднего угла подмышечной впадины (Т39), длина спины до талии с учетом выступа лопаток (Т40), длина спины до талии сзади до точки основания шеи сбоку (Т43), длина дуги верхней части туловища через точку основания шеи сбоку (Т44), ширина груди (Т45), расстояние между сосковыми точками (Т46), ширина спины (Т47). Контрольные измерения манекена проводились с помощью сантиметровой ленты.

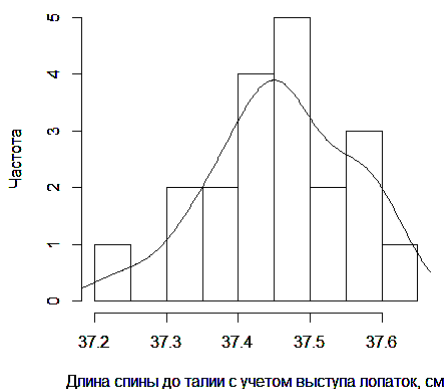


Рис. 5

На рис. 5 приведено распределение значений размерного признака "длина спины до талии с учетом выступа лопаток", изме-

ренных с использованием компьютерных 3D-моделей, полученных в результате повторного сканирования одного и того же манекена.

Для размерного признака "длина спины до талии с учетом выступа лопаток" (рис. 5) распределение значений соответствует нормальному распределению (критерий Шапиро-Уилка [22], $W = 0,96844$, $p\text{-value} = 0,7216$). Для всех измеренных размерных признаков при оценке нормальности распределения $p\text{-value}$ критерия Шапиро-Уилка превышало принятый уровень значимости $\alpha=0,05$. Таким образом, нет оснований для отклонения гипотезы о нормальном распределении измеренных значений размерных признаков.

Ошибка при измерении размерного признака e_i определяется по формуле

$$e_i = \frac{x_{\text{изм}} - x_i}{x_{\text{изм}}}, \quad (1)$$

где $x_{\text{изм}}$ – значение размерного признака, измеренное контактным методом, см; x_i – значение i -го измерения размерного признака на основе 3D-модели.

Анализ экспериментальных данных показал, что ошибка при измерении обхватов и дуговых размерных признаков не превышает 0,6 см, что обеспечивает достаточную точность измерений для конструирования одежды.

ВЫВОДЫ

1. На основе сенсоров Kinect и с использованием поворотного подиума разработан 3D-сканер фигуры человека.

2. Предложено использование в конструкции 3D-сканера лазерных излучателей для последующего упрощения процесса ориентации 3D-модели относительно горизонтальной плоскости в трехмерном пространстве.

3. Предложено использование специального инструмента, представляющего собой упругий деформирующийся цилиндр из прозрачного пластика, для повышения точности снятия размерных признаков "обхват груди первый", "обхват груди второй", "обхват груди третий", "обхват плеча".

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмичев В.Е. Кафедра конструирования швейных изделий ИВГПИУ – основные направления научных исследований и опытно-конструкторских работ // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, №4. С. 96...102.
2. Daanen H.A.M., Psikuta A. Automation in Garment Manufacturing. – 2018. P. 237...252.
3. Daanen H.A.M., Ter Haar F.B. 3D whole body scanners revisited // Displays. – V. 34, № 4, 2013. P.270...275.
4. 3DBODY.TECH Conference & Expo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3dbody.tech/>. – Дата доступа: 02.08.2019.
5. Ballester A., Piérola A., Parrilla E., Uriel J., Ruescas A.V., Pérez C., Durá J.V., Alemany S. 3D Human Models from 1D, 2D & 3D Inputs: Reliability and Compatibility of Body Measurements // 9th Int. Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies / Lugano, Switzerland, 2018.
6. Molyboga G., Makeev I. Statistical Model for Human Body Measurements // 9th Int. Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies. – Lugano, Switzerland, 2018.
7. Petrak S., Špelić I., Mahnić Naglič M. The Volumetric Analysis of the Human Body as Starting Point for Clothing Pattern Design // 9th Int. Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies. Lugano, Switzerland, 2018.
8. ГОСТ 31396–2009. Классификация типовых фигур женщин по ростам, размерам и полнотным группам для проектирования одежды. – М., 2011.
9. Jun-Ming Lu, Mao-Jiun J.Wang. Automated anthropometric data collection using 3D whole body scanners // Expert Systems with Applications. – V. 35, № 1–2, 2008. P. 407...414.
10. Prime Sense [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.forbes.com/sites/shelisrael/2013/11/25/why-would-apple-buy-primense/#74332a38e690>. – Дата доступа: 20.03.2017.
11. Microsoft Kinect [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xbox.com/en-us/kinect>. – Дата доступа: 13.05.2017.
12. José-Juan Hernández-López, Ana-Linnet Quintanilla-Olvera, José-Luis López-Ramírez, Francisco-Javier Rangel-Butanda, Mario-Alberto Ibarra-Manzano, Dora-Luz Almanza-Ojedab. Detecting objects using color and depth segmentation with Kinect sensor // Procedia Technology. – V.3, 2012. P.196...204.
13. Microsoft kinect specifications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx>. – Дата доступа: 25.10.2017.
14. 3D scanners comparison [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aniwaa.com/comparison/3d-scanners/>. – Дата доступа: 25.10.2017.
15. Yin Chen, Gang Dang, Zhi-Quan Cheng, Kai Xu. Fast capture of personalized avatar using two Kinects // Journal of Manufacturing Systems. – V. 33, №1, 2014. P. 233...240.

16. Maués C.P.R., Casagrande M.V.S., Almeida R.C.C., Almeida M.A.O., Carvalho F.A.R. Three-dimensional surface models of the facial soft tissues acquired with a low-cost scanner // International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. – 2018.

17. Mohammed A.Isa, Ismail Lazoglu Design and analysis of a 3D laser scanner // Measurement. – V. 111, 2017. P. 122...133.

18. Кузьмичев В.Е., Ахмедулова Н.И., Юдина Л.П. Конструирование швейных изделий: системное проектирование. – М., 2018. С. 392.

19. Rhinoceros [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rhino3d.com/>. – Дата доступа: 02.08.2019.

20. Grasshopper. Algorithmic modeling for rhino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.grasshopper3d.com/>. – Дата доступа: 02.08.2019.

21. Замотин Н.А., Дягилев А.С. Особенности сканирования фигуры человека с использованием бодисканера // В сб.: Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности. – Витебск, 2018. С. 132...134.

22. Дягилев А.С., Коган А.Г. Методы и средства исследований технологических процессов. – Витебск, 2012.

REFERENCES

1. Kuz'michev V.E. Kafedra konstruirovaniya shveynykh izdeliy IVGPU – osnovnye napravleniya nauchnykh issledovaniy i opytно-konstruktorskiikh rabot // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2018, №4. S. 96...102.
2. Daanen H.A.M., Psikuta A. Automation in Garment Manufacturing. – 2018. P. 237...252.
3. Daanen H.A.M., Ter Haar F.B. 3D whole body scanners revisited // Displays. – V. 34, № 4, 2013. P.270...275.
4. 3DBODY.TECH Conference & Expo [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.3dbody.tech/>. – Data dostupa: 02.08.2019.
5. Ballester A., Piérola A., Parrilla E., Uriel J., Ruescas A.V., Pérez C., Durá J.V., Alemany S. 3D Human Models from 1D, 2D & 3D Inputs: Reliability and Compatibility of Body Measurements // 9th Int. Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies / Lugano, Switzerland, 2018.
6. Molyboga G., Makeev I. Statistical Model for Human Body Measurements // 9th Int. Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies. – Lugano, Switzerland, 2018.
7. Petrak S., Špelić I., Mahnić Naglič M. The Volumetric Analysis of the Human Body as Starting Point for Clothing Pattern Design // 9th Int. Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies. Lugano, Switzerland, 2018.
8. GOST 31396–2009. Klassifikatsiya tipovykh figur zhenshin po rostam, razmeram i polnotnym grupam dlya proektirovaniya odezhdy. – M., 2011.
9. Jun-Ming Lu, Mao-Jiun J.Wang. Automated anthropometric data collection using 3D whole body scan-

ners // Expert Systems with Applications. – V. 35, № 1–2, 2008. P. 407...414.

10. Prime Sense [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.forbes.com/sites/shelisrael/2013/11/25/why-would-apple-buy-primesense/#74332a38e690>. – Data dostupa: 20.03.2017.

11. Microsoft Kinect [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.xbox.com/en-us/kinect>. – Data dostupa: 13.05.2017.

12. José-Juan Hernández-Lópeza, Ana-Linnet Quintanilla-Olvera, José-Luis López-Ramírez, Francisco-Javier Rangel-Butanda, Mario-Alberto Ibarra-Manzanao, Dora-Luz Almanza-Ojedab. Detecting objects using color and depth segmentation with Kinect sensor // Procedia Technology. – V.3, 2012. P.196...204.

13. Microsoft kinect specifications [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx>. – Data dostupa: 25.10.2017.

14. 3D scanners comparison [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.aniwaa.com/comparison/3d-scanners/>. – Data dostupa: 25.10.2017.

15. Yin Chen, Gang Dang, Zhi-Quan Cheng, Kai Xu. Fast capture of personalized avatar using two Kinects // Journal of Manufacturing Systems. – V. 33, №1, 2014. P. 233...240.

16. Maués C.P.R., Casagrande M.V.S., Almeida R.C.C., Almeida M.A.O., Carvalho F.A.R. Three-di-

mensional surface models of the facial soft tissues acquired with a low-cost scanner // International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. – 2018.

17. Mohammed A.Isa, Ismail Lazoglu Design and analysis of a 3D laser scanner // Measurement. – V. 111, 2017. P. 122...133.

18. Kuz'michev V.E., Akhmedulova N.I., Yudina L.P. Konstruirovaniye shveynykh izdeliy: sistemnoe proektirovaniye. – M., 2018. S. 392.

19. Rhinoceros [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.rhino3d.com/>. – Data dostupa: 02.08.2019.

20. Grasshopper. Algorithmic modeling for rhino [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.grasshopper3d.com/>. – Data dostupa: 02.08.2019.

21. Zamotin N.A., Dyagilev A.S. Osobennosti skanirovaniya figury cheloveka s ispol'zovaniem bodi-skanera // V sb.: Innovatsionnyye tekhnologii v tekstil'noy i legkoy promyshlennosti. – Vitebsk, 2018. S.132...134.

22. Dyagilev A.S., Kogan A.G. Metody i sredstva issledovaniy tekhnologicheskikh protsessov. – Vitebsk, 2012.

Рекомендована кафедрой математики и информационных технологий. Поступила 22.04.20.